第47卷 第3期
2024年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

不同温升情景下中国旱灾风险变化评估

卢冬燕[1,2]， 朱秀芳[1,2,3]， 唐明秀[1,2]， 郭春华[1,2]， 刘婷婷[1,2]

（1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875； 2. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院，北京 100875； 3. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室，北京 100875）

摘 要：干旱是致灾最为严重的极端气候事件之一，研究未来气候变暖背景下旱灾风险的变化有利于科学推进防灾减灾工作部署。利用第六次国际耦合模式比较计划的20个气候模式数据计算了标准化降水蒸散指数，提取了基准期及全球2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下中国的干旱特征变量并计算干旱危险性指数，基于承灾体预估数据计算干旱暴露度指数和干旱脆弱性指数，综合计算旱灾风险指数，从而分析中国旱灾风险分布格局并基于地理探测器对未来旱灾风险变化进行空间归因分析。结果表明：干旱危险性指数、干旱暴露度指数和干旱脆弱性指数的空间分布分别表现为西北和东南相对较高、东高西低、西高东低；旱灾风险指数具有东高西低的分布特点，呈现以高值集聚和低值集聚为主的空间正相关；随着温升水平的升高，未来旱灾风险以增加为主，东部沿海地区增加最为明显；人口数量变化、GDP变化和耕地占比变化是影响旱灾风险变化的主导因素。

关 键 词：旱灾风险； CMIP6； 温升情景； 空间自相关； 地理探测器

文章编号：1000－6060(2024)03－0369－11(0369～0379)

在全球变暖背景下，近年来世界各地的极端天气气候事件(高温热浪、干旱、强降水等)日益频繁[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)第六次评估报告(the Sixth Assessment Report，AR6)指出，2011—2020年全球平均气温较工业化前水平升高了约1.09 ℃，未来全球温升水平的持续增加将导致危害多发并发[2]。干旱作为一种频率高、持续久、危害大的极端气候事件，对水资源供应、农业生产、生态保护等诸多方面产生负面影响。中国是一个干旱灾害频发的农业大国，2017—2021年全国年均作物受旱面积为$7.8×10^6$ hm^2，旱灾造成的年均直接经济损失达$3.1×10^{10}$元[3]。研究表明，受气候变暖影响，过去几十年中国整体呈干旱化趋势，21世纪中后期变干趋势将持续[4]，危及经济社会可持续发展。因此，科学评估未来旱灾风险显得极为重要，能够为旱灾风险预警和防范提供科学支撑。

旱灾风险指干旱的发生对社会经济和生态环境造成不利影响的可能性，是致灾因子危险性、承灾体暴露度和脆弱性相互作用的结果[5]。旱灾的致灾因子是指气象系统异常造成的干旱，干旱危险性分析一般是基于干旱指数识别干旱过程，提取用于定量描述干旱事件的干旱特征变量(干旱历时、干旱强度等)并加以分析[6]。旱灾的承灾体为受旱灾影响和威胁的人类社会主体，在同等致灾因子作用下，承灾体的暴露度和脆弱性越大，风险越大。暴露度反映了暴露在干旱下的人口和资产的规模，可用人口密度、GDP等指标进行量化；脆弱性反映了承灾体对干旱的敏感性和应对能力，可用人均GDP、土地利用情况等指标进行量化[7]。不少研究从干旱危险性、承灾体暴露度和脆弱性3个方面进行分析，构建3个综合指标并计算其乘积以表征旱灾风险[8-10]，为旱灾风险评估框架的构建提供了参考。

目前，旱灾风险评估多基于历史资料开展，而通过引入未来情景数据可开展未来旱灾风险预估。世界气候研究计划(WCRP)组织的国际耦合模

收稿日期：2023-08-23； **修订日期**：2023-10-11

基金项目：国家自然科学基金面上基金项目(42077436)；国家重点研发计划项目(2019YFA0606900)资助

作者简介：卢冬燕(1999-)，女，硕士研究生，主要从事气象灾害风险评估研究. E-mail: 202221051098@mail.bnu.edu.cn

通讯作者：朱秀芳(1982-)，女，博士，教授，主要从事遥感应用及灾害相关的研究. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

式比较计划已进入第6阶段(CMIP6),所提供的气候模式数据在未来气候预测研究中应用广泛[11]。同时,基于共享社会经济路径(SSPs)的社会经济要素(人口、经济、土地利用等)定量模拟和预估数据集逐渐丰富,为气象灾害的承灾体暴露度和脆弱性评估提供了数据支撑[12]。已有研究结合气候模式数据和承灾体预估数据对全球和区域尺度的未来旱灾风险进行了预估[7,13-14],但对不同温升情景关注较少。为了更好地应对全球温升加剧对旱灾应急管理带来的挑战,有必要预估未来不同温升情景下干旱对经济社会的影响。综上,本研究基于CMIP6气候模式数据和承灾体预估数据评估2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下的中国旱灾风险及其变化,以期为全球变暖背景下抗旱减灾方案制定提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国地处亚洲东部,是一个地域广阔、地形复杂、气候多样的国家。为对比分析不同区域的旱灾风险特征,本文根据前人研究将中国划分为7个自然地区[15],即东北湿润半湿润温带地区、华北湿润半湿润暖温带地区、华中华南湿润亚热带地区、华南湿润热带地区、内蒙草原地区、西北荒漠地区和青藏高原地区,分别用A、B、C、D、E、F和G表示(图1)。该区划方案按照地理位置、地貌、气候、植被等



图1 中国7个自然地区

Fig. 1 Seven natural regions of China

因素的差异性和相似性进行划分[15],已广泛应用于中国干旱相关的研究[16]。

1.2 数据来源

1.2.1 气象观测数据 CN05.1数据集基于中国2400多个气象台站1961年至今的观测资料使用距平逼近法插值得到,分辨率为0.25°,是目前中国区域最精确的格点化气象观测数据集[17-18]。本研究将1961—2014年逐月气象要素(降水量、最高气温、最低气温、平均风速、相对湿度和日照时数)双线性插值为0.5°分辨率,用于评估CMIP6历史气候模拟数据。

1.2.2 气候模式数据 CMIP6气候模式数据由WCRP提供(https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6),是气候变化预测研究中最先进、最可靠的数据源之一[11]。历史气候模拟试验提供了1850—2014年的历史气候模拟数据,情景模式比较计划提供了2015—2100年的未来气候预估数据[11]。本研究使用1995—2100年逐月的平均气温数据计算全球温升水平,使用1961—2100年逐月的降水量、最高气温、最低气温、风速、相对湿度、地表下行短波辐射、气压数据计算干旱指数。情景模式比较计划设计的气候预估情景是不同SSPs与辐射强迫水平的组合情景,本研究选取了SSP5-8.5情景(化石燃料驱动的发展路径与高辐射强迫情景)[19],这是唯一能够达到4 ℃温升水平的气候预估情景。选取了包含所需变量的20个气候模式(表1),将各模式数据双线性插值为0.5°分辨率。

1.2.3 高程数据 美国地质勘探局提供了2010年全球多分辨率地形高程数据(GMTED2010)[20],可满足不同尺度和不同领域的应用需求。本研究将30″分辨率的平均高程数据采用均值聚合方法重采样为0.5°分辨率,用于计算干旱指数。

1.2.4 人口和GDP数据 姜彤等[21]发布了5种SSPs的人口和经济预估数据,包含2010—2100年0.5°分辨率的中国逐年人口和GDP数据。该数据集考虑了人口政策变化对人口结构和经济的影响,比较贴近中国国情[22]。本研究使用SSP5的人口和GDP数据进行承灾体暴露度和脆弱性评估。

1.2.5 土地利用数据 土地利用协调(LUH2)数据集是CMIP6试验的基础驱动数据,包含850—2100年0.25°分辨率的全球逐年土地利用数据[23]。本研究基于历史数据和SSP5-8.5情景数据提取1995—2100年中国的耕地占比和灌溉占比,即每个格点的

表1 研究所使用的20个CMIP6气候模式信息

Tab. 1 Information of 20 climate models from CMIP6 used in this study

序号	模式名称	机构简称	国家	经纬向格点数
1	ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS	澳大利亚	192×144
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO	澳大利亚	192×145
3	CanESM5	CCCma	加拿大	128×64
4	CanESM5-1	CCCma	加拿大	128×64
5	CAS-ESM2-0	CAS	中国	256×128
6	CMCC-ESM2	CMCC	意大利	288×192
7	EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	欧盟	512×256
8	EC-Earth3-CC	EC-Earth-Consortium	欧盟	512×256
9	EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium	欧盟	512×256
10	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth-Consortium	欧盟	320×160
11	FGOALS-g3	CAS	中国	180×80
12	FIO-ESM-2-0	FIO-QLNM	中国	288×192
13	GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	美国	288×180
14	INM-CM4-8	INM	俄罗斯	180×120
15	INM-CM5-0	INM	俄罗斯	180×120
16	IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国	144×143
17	MIROC6	MIROC	日本	256×128
18	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M	德国	384×192
19	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M	德国	192×96
20	MRI-ESM2-0	MRI	日本	320×160

耕地面积和灌溉面积占该格点面积的比例，采用面积加权平均方法将分辨率统一为0.5°，用于承灾体暴露度和脆弱性的评估。

1.3 研究方法

1.3.1 泰勒图方法 泰勒图方法是评估气候模式模拟性能的一种常用方法，将相关系数(r)、标准差(SD)以及均方根误差(RMSE)3个统计量显示在一张图中，较直观地给出模拟值与观测值的差异[24]。本研究使用标准化泰勒图，将观测值和模拟值的SD和RMSE除以观测值的SD，以消除量纲。标准化泰勒图中，观测值的SD为1，RMSE为0。模拟性能较好的气候模式其r和SD接近1且RMSE接近0。

1.3.2 不同温升情景的确定 根据IPCC AR6，1995—2014年的全球变暖观测值为0.85 ℃[2]。因此，本研究将1995—2014年作为温升水平计算和旱灾风险评估的基准期。基于CMIP6各模式逐月的平均气温格点数据，采用面积加权平均法计算1995—2100年的逐年全球平均气温。对于每个模式，计算其20 a滑动平均气温，与基准期平均气温作差，将温差首次达到1.15 ℃、2.15 ℃、3.15 ℃的未来某个20 a时间段定义为2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景对应的时间段。

1.3.3 旱灾风险评估模型

(1) 干旱危险性分析

使用1个月时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI)作为监测气象干旱的指标，无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱对应的SPEI数值范围分别为：>−0.5、(−1.0, −0.5]、(−1.5, −1.0]、(−2.0, −1.5]、<−2.0[25]。SPEI考虑了蒸散量对气温变化敏感的特点[26]，该指数由降水量与潜在蒸散量(PET)的差值构建，计算方法可参考国家标准《气象干旱等级》[25]。本研究中PET的计算采用Penman-Monteith方法，PET和SPEI的计算使用R语言SPEI包[27]。首先基于1961—2014年数据计算各模式SPEI，再将所得拟合参数用于2015—2100年SPEI的计算。

参照前人研究[28]，基于SPEI采用三阈值游程理论方法识别干旱事件，选取的3个阈值分别为0、−0.5和−1。提取基准期和2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景(后续简称4种情景)的20 a期间干旱频次、干旱历时和干旱强度3个特征变量。其中，干旱频次是平均每年发生的干旱事件数(次·a^{-1})；一次干旱事件的历时和强度分别指干旱事件持续月数和干旱事件中SPEI

均值的绝对值，本研究中干旱历时和干旱强度通过对20 a期间各干旱事件的历时和强度取均值得到。基于干旱特征变量构建干旱危险性指数（DHI）[29]，计算4种情景下各模式DHI，再对4种情景的各模式结果取均值。DHI计算公式如下：

$$\mathrm{DHI} = W_1(F \times D)' + W_2(F \times I)' \quad (1)$$

式中：W_1、W_2为权重系数，均为0.5；$(F\times D)'$、$(F\times I)'$分别为干旱频次（F）与干旱历时（D）、干旱强度（I）相乘所得乘积的归一化值，归一化处理使用极值标准化法[30]。

（2）暴露度和脆弱性分析

本研究选用人口数量、GDP和耕地占比3个正向指标对暴露度进行量化，对3个指标进行归一化处理后取等权重均值，得到干旱暴露度指数（DEI）。选用人均GDP和灌溉占比2个负向指标对脆弱性进行量化，对2个指标进行归一化处理后取等权重均值，得到干旱脆弱性指数（DVI）。

由于人口和GDP预估数据是基于2010年的数据生成，因此对于人口数量、GDP、人均GDP，基准期指标使用2010年数据，而未来温升情景下指标则使用20 a数据均值。对于耕地占比和灌溉占比2个指标，4种情景下指标均使用20 a数据均值。

（3）旱灾风险指数计算

将3个综合指数DHI、DEI、DVI相乘，得到4种情景的旱灾风险指数（DRI），计算公式如下：

$$\mathrm{DRI} = \mathrm{DHI} \times \mathrm{DEI} \times \mathrm{DVI} \quad (2)$$

1.3.4 DRI空间格局与变化分析

（1）空间自相关分析

基于GeoDa软件对4种情景的DRI进行空间自相关性分析。采用全局Moran's I从整个研究区尺度检测空间自相关性，指数的取值范围为−1~1，大于0表示正相关，小于0表示负相关，等于0则表示随机分布。采用局部Moran's I作为局部空间关联指标（LISA），分析空间集聚特征[31]。

（2）地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及其驱动因素的工具，包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测[32]。本文基于地理探测器分析旱灾风险变化空间分异性的影响因子，使用因子探测和交互作用探测得到衡量自变量对因变量解释度的q值。将每个温升情景下DRI与基准期DRI作差，得到旱灾风险变化，作为输入地理探测器的因变量。自变量则为8个指标（干旱频次、干旱历时、干旱强度、人口数量、GDP、耕地占比、人均GDP、灌溉占比）的变化，即每个温升情景下指标值与基准期指标值的差值。利用R语言GD包实现自变量最优离散化处理并执行地理探测器分析[33]。

2 结果与分析

2.1 气候模式模拟性能评估

由于SPEI基于降水量和PET计算得到，CMIP6数据对中国降水量和PET模拟的准确性可反映其对干旱的模拟能力。利用1961—2014年的CN05.1观测数据对CMIP6降水和PET模拟数据进行了评估，气候模式的模拟性能在标准化泰勒图上表现为距离观测值越近越好（图2）。降水量模拟值与观测值的r范围为0.52~0.71，PET的r范围为0.88~0.93。各模式降水量的SD均大于1，最大值为1.61，而PET的SD范围为0.93~1.39。降水量和PET的RMSE范围分别为0.78~1.32和0.37~0.68。总体来看，各模式对降水量和PET的模拟性能良好，可用于分析中国干旱危险性。

2.2 温升情景确定结果

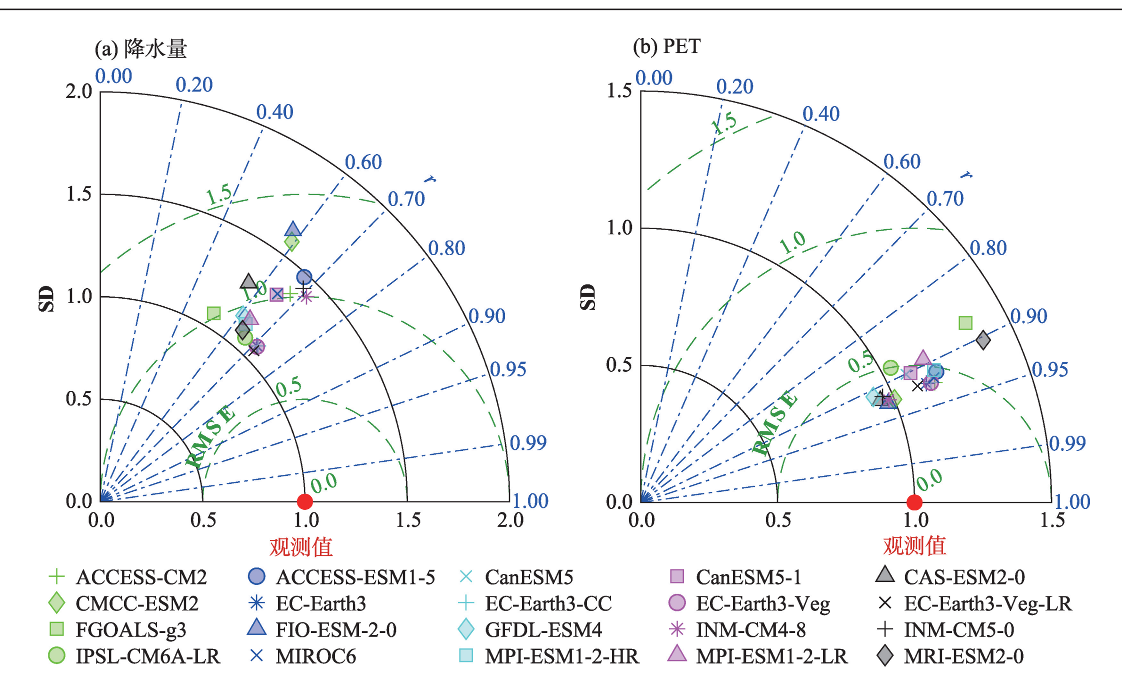
统计20个气候模式达到2 ℃、3 ℃、4 ℃温升水平的20 a时间段（表2）发现，所有气候模式都能达到2 ℃、3 ℃温升水平，其中有14个模式达到4 ℃温升水平。

2.3 DHI、DEI、DVI 3个综合指数计算结果

计算4种情景下的DHI、DEI、DVI，使用分位数法分别将3个综合指数值分为5个等级，得到3个综合指数等级图（图3），第1等级到第5等级（G1~G5）所对应的指数值依次增大。DHI等级呈现西北与东南相对较高的格局，与中国西北干旱历时长、强度大以及中国东南干旱频次高的特点相对应[34]。DHI整体上随着温升水平的增加而增大，表明未来中国整体呈现暖干化趋势。DEI等级呈东高西低的格局且整体随时间的推移而增加，DVI等级则呈西高东低的格局且整体随时间的推移而降低，这与中国社会经济发展水平东高西低的格局相符，未来由于人口增长和经济发展，暴露度有所提高而脆弱性有所降低。

2.4 DRI空间格局分析

使用分位数法将DRI数值分为5个等级，



注：*r*、SD、RMSE、PET分别为相关系数、标准差、均方根误差、潜在蒸散量。

图2　各气候模式降水量和PET的标准化泰勒图

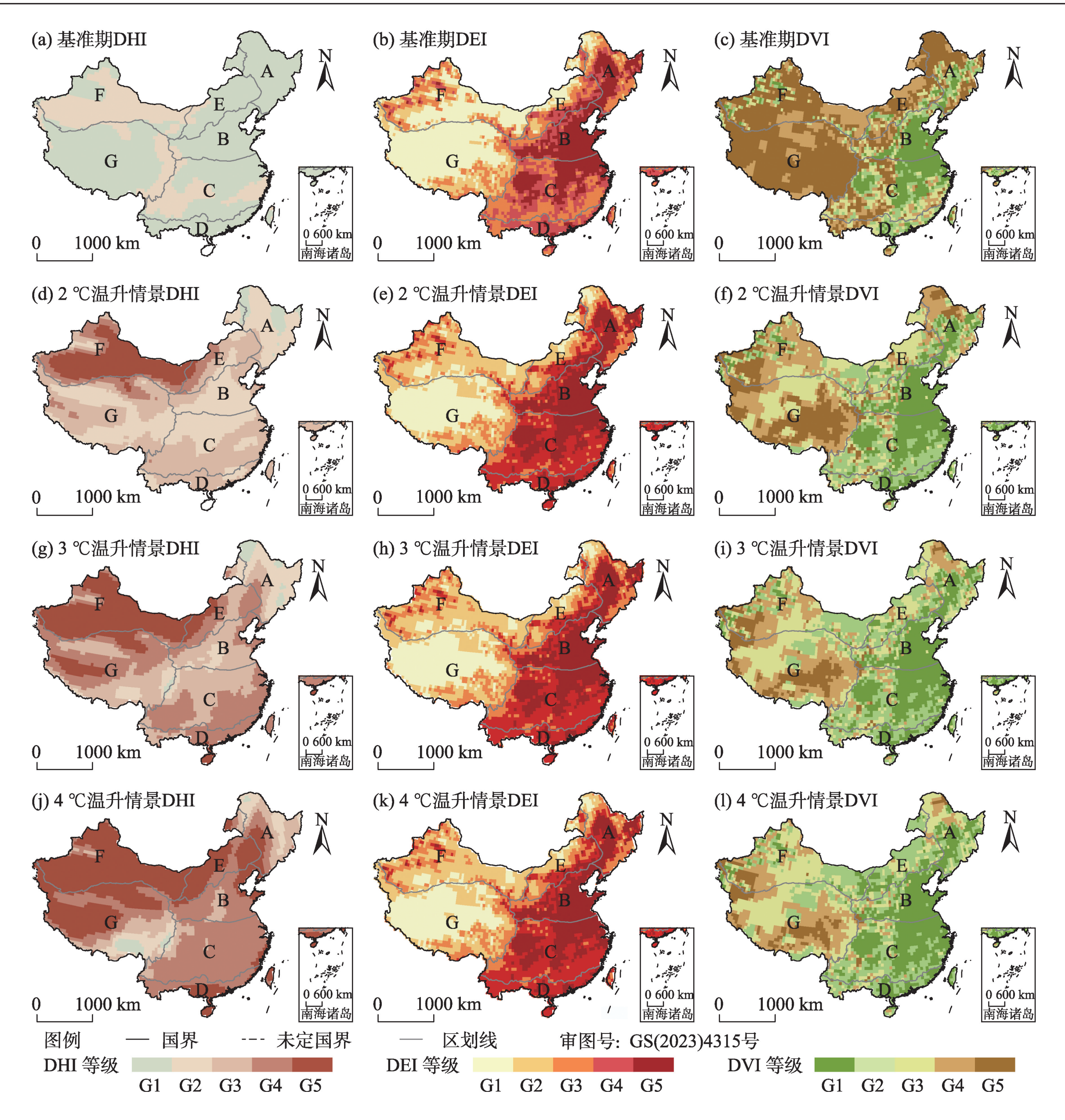
Fig. 2　Standardized Taylor diagrams of precipitation and PET for each climate model

表2　各气候模式2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景年份

Tab. 2　Years for 2 ℃, 3 ℃, and 4 ℃ temperature rise scenarios for each climate model

模式名称	年份		
	2 ℃温升情景	3 ℃温升情景	4 ℃温升情景
ACCESS-CM2	2024—2043	2043—2062	2058—2077
ACCESS-ESM1-5	2029—2048	2050—2069	2068—2087
CanESM5	2021—2040	2037—2056	2050—2069
CanESM5-1	2021—2040	2036—2055	2050—2069
CAS-ESM2-0	2029—2048	2047—2066	2063—2082
CMCC-ESM2	2033—2052	2049—2068	2064—2083
EC-Earth3	2026—2045	2048—2067	2064—2083
EC-Earth3-CC	2039—2058	2056—2075	2069—2088
EC-Earth3-Veg	2031—2050	2049—2068	2065—2084
EC-Earth3-Veg-LR	2034—2053	2054—2073	2067—2086
FGOALS-g3	2039—2058	2066—2085	–
FIO-ESM-2-0	2031—2050	2050—2069	2066—2085
GFDL-ESM4	2037—2056	2061—2080	–
INM-CM4-8	2037—2056	2060—2079	–
INM-CM5-0	2035—2054	2063—2082	–
IPSL-CM6A-LR	2029—2048	2045—2064	2060—2079
MIROC6	2037—2056	2062—2081	2080—2099
MPI-ESM1-2-HR	2039—2058	2064—2083	–
MPI-ESM1-2-LR	2040—2059	2063—2082	–
MRI-ESM2-0	2025—2044	2052—2071	2071—2090

注：“–”表示气候模式不能达到4 ℃温升情景。



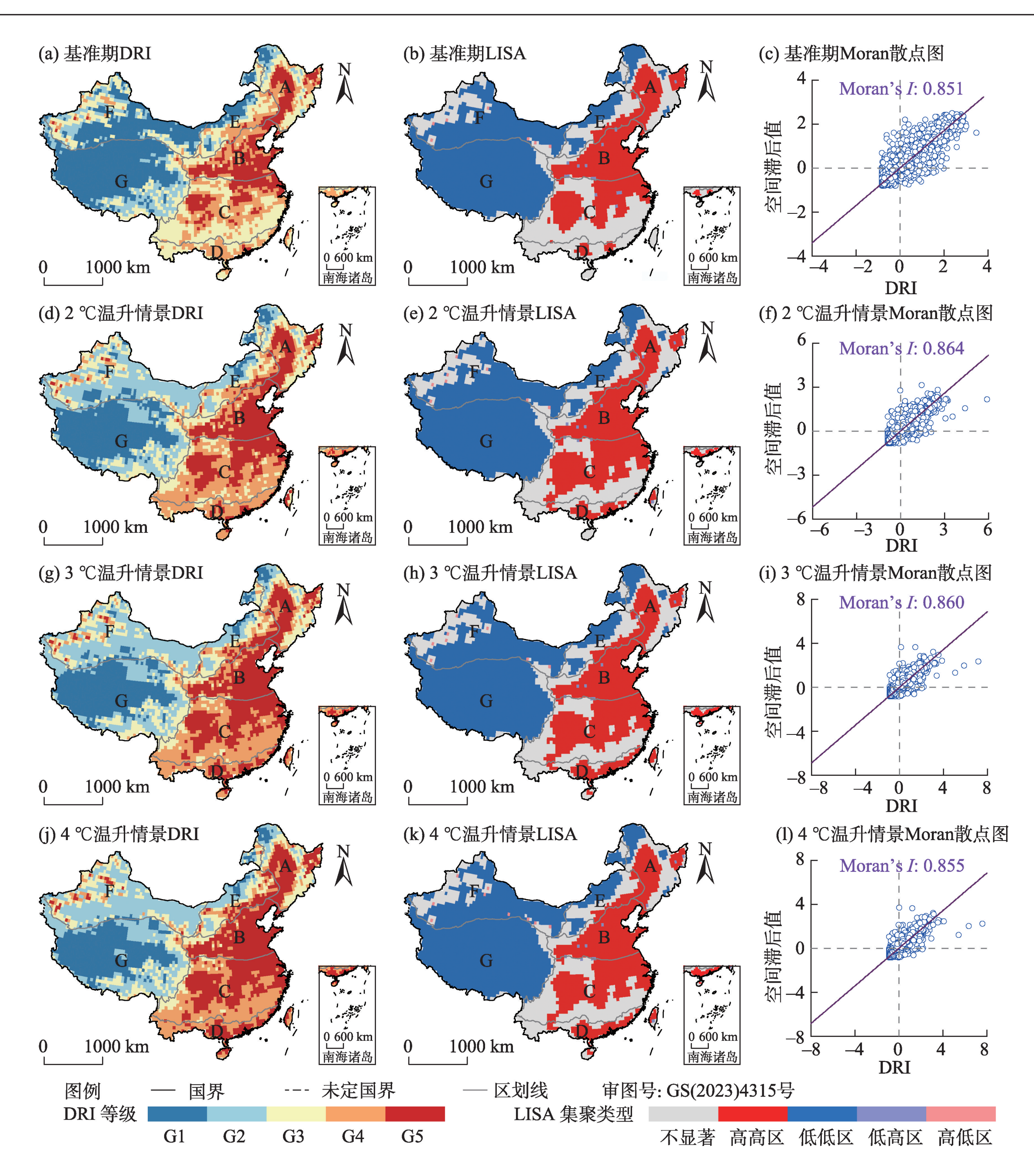
注：DHI、DEI、DVI分别为干旱危险性指数、干旱暴露度指数、干旱脆弱性指数。下同。

图3 基准期和2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下中国DHI、DEI、DVI等级分布

Fig. 3 Distributions of DHI, DEI, and DVI grades for the baseline period and the 2 ℃, 3 ℃, and 4 ℃ temperature rise scenarios in China

G1~G5所对应的DRI数值依次增大(图4a、d、g、j)。DRI等级呈东高西低的格局，且随温升水平的增加而整体增大。全局空间自相关分析结果显示，4种情景下的全局Moran's I值分别为0.851、0.864、0.860和0.855，且都通过了显著性检验($P<0.001$)。根据Moran散点图(图4c、f、i、l)，大多数散点均落在第一象限(高高区)和第三象限(低低区)，少数散点落在了第二象限(低高区)和第四象限(高低区)，表明DRI空间分布呈现以高值集聚和低值集聚为主的空间正相关。进一步绘制了0.05显著性水平下的LISA集聚图(图4b、e、h、k)，将所有格点分为5种类型：不显著、高高区、低低区、低高区和高低区。高值集聚区主要分布在地区A、B、C、D，而低值集聚区主要分布在地区E、F、G。

全国及7个自然地区的DRI箱线图(图5)显示：从全国来看，DRI的最大值、中位数和均值从基准期到4 ℃温升情景依次增大，3个温升情景下的极差依次增大，平均值全部大于中位数。分区域来看，在



注：DRI为旱灾风险指数；LISA为局部空间关联指标。下同。

图4　DRI等级分布及空间自相关性分析结果

Fig. 4　DRI grade distributions and results of spatial autocorrelation analysis

基准期，DRI的最大值出现在C地区，中位数与均值的排序一致，各地区由高到低依次为：B、C、A、D、E、F、G；在3个温升情景下，DRI最大值仍出现在C地区，中位数与均值最高的3个地区为地区B、C、D，最低的地区为G；整体来看，7个自然地区DRI随着温升水平的增加而增大。

2.5　旱灾风险变化分析

将2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下的旱灾风险变化值划分为6个等级，得到空间分布如图6所示。整体来看，3个温升情景下的DRI相对于基准期以增大为主，在中国东部沿海地区增大较明显。随着温升水平的升高，DRI增加值整体增大。

因子探测和交互作用探测结果如图7所示。就单因子而言，在3个温升情景下，8个影响因子的q值均通过了0.001水平的显著性检验，q值排名前3的影响因子均为人口数量变化、GDP变化、耕地占

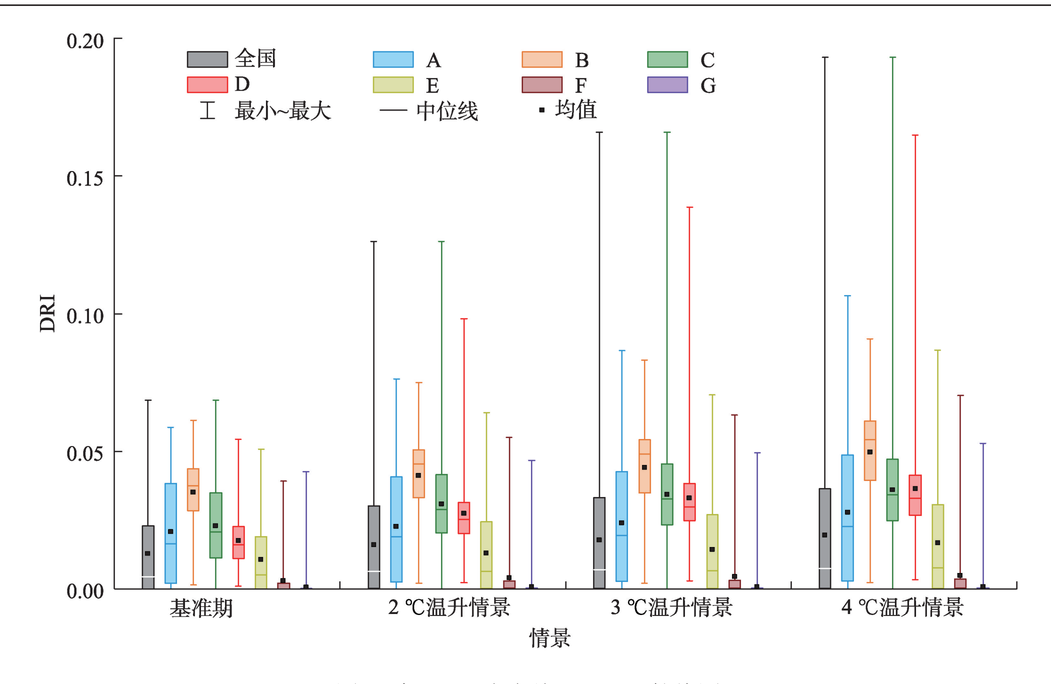


图5　全国和7个自然地区DRI箱线图

Fig. 5　Box plots of DRI for the whole country and 7 natural regions

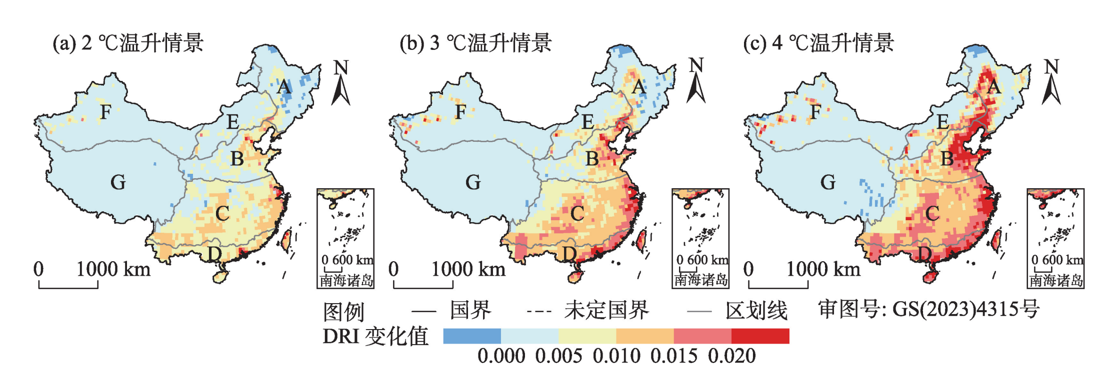
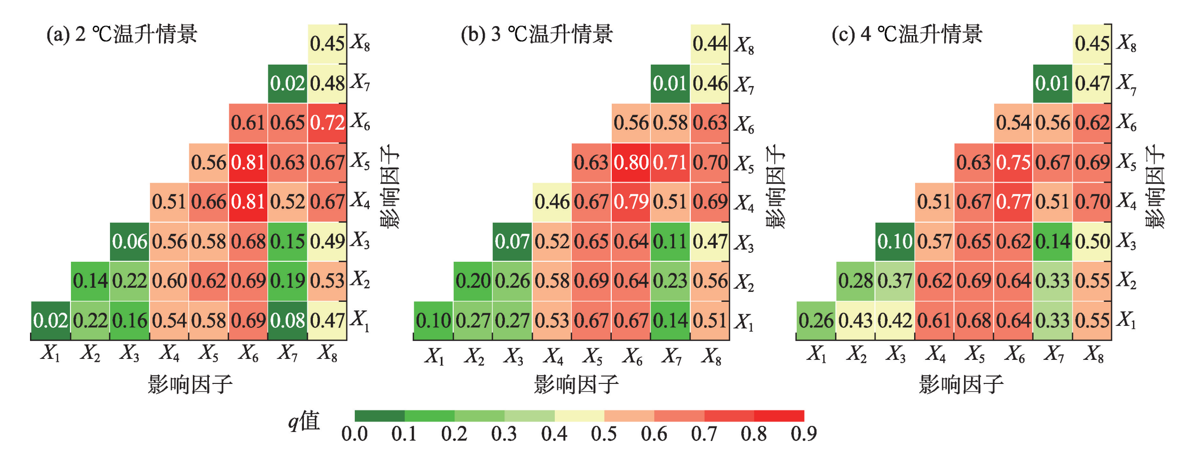


图6　2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下旱灾风险变化分布

Fig. 6　Distributions of changes in drought risk under 2 ℃, 3 ℃, and 4 ℃ temperature rise scenarios



(a) 2 ℃温升情景

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_8								0.45
X_7							0.02	0.48
X_6						0.61	0.65	0.72
X_5					0.56	0.81	0.63	0.67
X_4				0.51	0.66	0.81	0.52	0.67
X_3			0.06	0.56	0.58	0.68	0.15	0.49
X_2		0.14	0.22	0.60	0.62	0.69	0.19	0.53
X_1	0.02	0.22	0.16	0.54	0.58	0.69	0.08	0.47

(b) 3 ℃温升情景

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_8								0.44
X_7							0.01	0.46
X_6						0.56	0.58	0.63
X_5					0.63	0.80	0.71	0.70
X_4				0.46	0.67	0.79	0.51	0.69
X_3			0.07	0.52	0.65	0.64	0.11	0.47
X_2		0.20	0.26	0.58	0.69	0.64	0.23	0.56
X_1	0.10	0.27	0.27	0.53	0.67	0.67	0.14	0.51

(c) 4 ℃温升情景

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_8								0.45
X_7							0.01	0.47
X_6						0.54	0.56	0.62
X_5					0.63	0.75	0.67	0.69
X_4				0.51	0.67	0.77	0.51	0.70
X_3			0.10	0.57	0.65	0.62	0.14	0.50
X_2		0.28	0.37	0.62	0.69	0.64	0.33	0.55
X_1	0.26	0.43	0.42	0.61	0.68	0.64	0.33	0.55

注：X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8分别为干旱频次、干旱历时、干旱强度、人口数量、GDP、耕地占比、人均GDP、灌溉占比的变化；q为自变量对因变量解释度。

图7　因子探测和交互作用探测结果

Fig. 7　Results of factor detection and interaction detection

比变化；在2 ℃温升情景下，耕地占比变化对旱灾风险变化的解释度最大，为61%；在3 ℃、4 ℃温升情景下，GDP变化对旱灾风险变化的解释度最大，为63%。就影响因子交互作用而言，交互作用类型为双因子增强和非线性增强；在3个温升情景下，对旱灾风险变化解释力最大的2对交互作用影响因子均为耕地占比变化∩人口数量变化、耕地占比变化∩GDP变化，其交互作用对风险变化的解释程度在75%以上，表明承灾体暴露度变化对旱灾风险变化的解释能力较强。综合来看，影响因子两两交互作用相对于单因子而言能更好地解释旱灾风险变化。干旱频次变化、干旱历时变化、干旱强度变化的单因子q值及两两交互作用的q值在2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下依次增大，表明干旱危险性变化对旱灾风险变化的影响随着温升加剧而更加明显。

3 讨 论

目前，基于未来情景数据进行中国旱灾风险预估的研究相对较少，且已有研究多为区域性研究[14,35]。本文引入未来预估数据所得中国旱灾风险的空间分布与赵佳琪等[5]基于历史数据所得结果类似，表明了研究结果的可靠性。与前人研究相比，本文从不同温升情景的角度开展旱灾风险评估，并分析了未来旱灾风险变化的驱动因素，有助于更好地认识中国旱灾风险随着全球温升加剧而发生的变化，为气候变化风险防范提供了参考依据。然而，本研究还存在一些不足之处。由于未来气候变化和人类活动的复杂性以及气候模式的不确定性，基于SSP5-8.5情景的气候模式数据所得结果具有较大的不确定性，中国未来气候是否持续暖干化还有待进一步探讨。同时，指标选取、数据处理方式、权重设置等也会造成旱灾风险评估结果的不确定性。此外，本文对中国所有格点进行了旱灾风险变化的全局驱动力探测，但不同地区由于自然和社会经济条件存在差异，旱灾风险变化的主导因素可能有所不同，未来可进一步探测不同地区的局域驱动力并分析其差异。

4 结 论

本研究利用20个CMIP6气候模式数据和承灾体预估数据，对致灾因子危险性、承灾体暴露度和脆弱性进行量化，计算了DHI、DEI和DVI，从而将3个综合指数相乘得到DRI，评估了2 ℃、3 ℃、4 ℃温升情景下的中国旱灾风险及其相对于基准期的变化，主要结论如下：

（1）DHI、DEI和DVI有较明显的空间分布规律。DHI整体上表现为西北和东南相对较高，DEI和DVI则分别表现为东高西低、西高东低。随着温升水平的升高，干旱危险性增加明显，承灾体暴露度整体有所增加，而承灾体脆弱性有所降低。

（2）DRI呈现明显的空间集聚特征，高值空间集聚区主要分布在东部季风区，低值空间集聚区主要分布在西部地区，中国旱灾风险在基准期和不同温升情景下都呈东高西低的特点。

（3）与基准期相比，3个温升情景下的DRI以增大为主，中国东部沿海地区增大最为明显。随着温升水平的升高，风险增加值整体呈增长趋势。通过对旱灾风险变化进行全局驱动力探测，发现人口数量变化、GDP变化和耕地占比变化是主要驱动因子，因子两两交互作用相对于单因子对旱灾风险变化有更强的解释力。

参考文献（References）

[1] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63. [Zhai Panmao, Liu Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(9): 55-63.]

[2] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

[3] 中国水旱灾害防御公报编写组.《中国水旱灾害防御公报2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 26-32. [Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of "China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin in 2020"[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 26-32.]

[4] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM预测情景下中国21世纪干旱演变趋势分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1244-1256. [Mo Xingguo, Hu Shi, Lu Hongjian, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1244-1256.]

[5] 赵佳琪, 张强, 朱秀迪, 等. 中国旱灾风险定量评估[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1021-1031. [Zhao Jiaqi, Zhang Qiang, Zhu Xiudi, et al. Quantitative assessment of drought risk in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1021-1031.]

[6] 何斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 557-564. [He Bin, Wu Jianjun, Lü Aifeng. New advances in agricultural drought risk study[J]. Progress in Geography, 2010, 29(5): 557-564.]

[7] Liu Y Y, Chen J. Future global socioeconomic risk to droughts based on estimates of hazard, exposure, and vulnerability in a changing climate[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 142159, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142159.

[8] Carrão H, Naumann G, Barbosa P. Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2016, 39: 108-124.

[9] Prabnakorn S, Maskey S, Suryadi F X, et al. Assessment of drought hazard, exposure, vulnerability, and risk for rice cultivation in the Mun River Basin in Thailand[J]. Natural Hazards, 2019, 97(2): 891-911.

[10] Fang W, Huang Q, Huang G, et al. Assessment of dynamic drought-induced ecosystem risk: Integrating time-varying hazard frequency, exposure and vulnerability[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 342: 118176, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118176.

[11] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456. [Zhou Tianjun, Zou Liwei, Chen Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456.]

[12] 景丞, 姜彤, 苏布达, 等. 共享社会经济路径在土地利用、能源与碳排放研究的应用[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 397-413. [Jing Cheng, Jiang Tong, Su Buda, et al. Multiple application of shared socioeconomic pathways in land use, energy and carbon emission research[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(3): 397-413.]

[13] Oh H, Kim H J, Mehboob M S, et al. Sources and uncertainties of future global drought risk with ISIMIP2b climate scenarios and socioeconomic indicators[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160371, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160371.

[14] 薛雨婷, 李谢辉, 贾何佳. 基于CMIP6模式的西南地区旱灾风险未来预估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 247-255. [Xue Yuting, Li Xiehui, Jia Hejia. Future projection of drought risk in southwestern China based on CMIP6 model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 247-255.]

[15] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案[J]. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10. [Zhao Songqiao. A new scheme for comprehensive physical regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1983, 38(1): 1-10.]

[16] Zhang G, Su X, Singh V P, et al. Appraising standardized moisture anomaly index (SZI) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100898, doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100898.

[17] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. [Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.]

[18] 粟晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. [Su Xiaoling, Chu Jiangdong, Zhang Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in northwest China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42.]

[19] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9: 3461-3482.

[20] Danielson J J, Gesch D B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)[R]. Reston, VA, USA: U.S. Geological Survey, 2011.

[21] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 381-383. [Jiang Tong, Su Buda, Wang Yanjun, et al. Gridded datasets for population and economy under shared socioeconomic pathways for 2020—2100[J]. Climate Change Research, 2022, 18(3): 381-383.]

[22] Huang J L, Qin D H, Jiang T, et al. Effect of fertility policy changes on the population structure and economy of China: From the perspective of the shared socioeconomic pathways[J]. Earth's Future, 2019, 7(3): 250-265.

[23] Hurtt G C, Chini L, Sahajpal R, et al. Harmonization of global land use change and management for the period 850-2100 (LUH2) for CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(11): 5425-5464.

[24] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D7): 7183-7192.

[25] GB/T 20481-2017. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [GB/T 20481-2017. National Standard of the People's Republic of China: Grades of meteorological drought[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[26] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. [Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.]

[27] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10): 3001-3023.

[28] Ma Z, Sun P, Zhang Q, et al. The characteristics and evaluation of future droughts across China through the CMIP6 multi-model ensemble[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 1097, doi: 10.3390/rs14051097.

[29] 费振宇, 孙宏巍, 金菊良, 等. 近50年中国气象干旱危险性的时空格局探讨[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 5-10. [Fei Zhenyu,

Sun Hongwei, Jin Juliang, et al. Temporal and spatial patterns of meteorological drought hazard in China for recent 50 years[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(12): 5-10.]
[30] 徐玉霞, 许小明, 方锋, 等. 县域尺度下的宝鸡市农业洪水灾害脆弱性评价及区划[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 652-660. [Xu Yuxia, Xu Xiaoming, Fang Feng, et al. Assessment and zoning of vulnerability of agricultural flood diaster in Baoji City based on county scale[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 652-660.]
[31] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖流域地表温度时空变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1084-1097. [Kang Ligang, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Spatiotemporal variation of land surface temperature in Qinghai Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1084-1097.]
[32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]
[33] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
[34] 卢冬燕, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 2 ℃温升情景下中国气象干旱特征变化[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1227-1237. [Lu Dongyan, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Changes in meteorological drought characteristics in China under the 2 ℃ temperature rise scenario[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1227-1237.]
[35] 尹晓东, 董思言, 韩振宇, 等. 未来50 a长江三角洲地区干旱和洪涝灾害风险预估[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(5): 66-75. [Yin Xiaodong, Dong Siyan, Han Zhenyu, et al. Projected risk of drought and flood at Yangtze River Delta for the next 50 years[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(5): 66-75.]

Assessment of drought risk changes in China under different temperature rise scenarios

LU Dongyan[1,2], ZHU Xiufang[1,2,3], TANG Mingxiu[1,2], GUO Chunhua[1,2], LIU Tingting[1,2]
(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters of Chinese Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Drought is one of the most disastrous extreme climate events. Studying the changes in drought risk against the background of future global warming is beneficial for scientifically advancing disaster prevention and reduction work deployment. The standardized precipitation evapotranspiration index was calculated using data from 20 climate models from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project. Drought characteristic variables were extracted for the baseline period and global temperature rise scenarios of 2 ℃, 3 ℃, and 4 ℃ in China, and the drought hazard index (DHI) was calculated. Based on the disaster-bearing body projection data, the drought exposure index (DEI), drought vulnerability index (DVI), and drought risk index (DRI) were comprehensively calculated. The distribution pattern of drought risk in China was further analyzed, and a spatial attribution analysis of future drought risk changes was performed using a geodetector. The results showed that the spatial distribution of DHI, DEI, and DVI exhibited higher values in the northwest and southeast, a pattern of being high in the east and low in the west, and a trend of being high in the west and low in the east, respectively. Based on this, the DRI specially showed a spatial positive correlation dominated by high- and low-value clustering. With an increase in the temperature rise level, the future drought risk will mainly increase across China, and the increase in the eastern coastal areas would be the most obvious. Changes in population, gross domestic product, and the proportion of cultivated land were found to be the main factors affecting changes in drought risk.

Key words: drought risk; CMIP6; temperature rise scenario; spatial autocorrelation; geodetector